



「もんじゅ」フローモニタの開発

戸村 和二 弟子丸剛英 奥田 芳久
大場 俊雄 石川 紘一*

高速増殖炉もんじゅ建設所
*動力炉開発推進本部

資料番号90-3

Development of Fuel Flow Monitoring System in Prototype
Fast Breeder Reactor "MONJU"

Katsuji Tomura Takehide Doshimaru Yoshihisa Okuda
Toshio Ohba Kouichi Ishikawa*
(Monju Construction Office
*Reactor Development Project)

保障措置上課題となる接近困難な区域を持つ「もんじゅ」の査察・検認は、経験の多い軽水炉とはかなり相違点がある。このため、度重なるIAEA、科技庁との打合わせを行い「もんじゅ」の保障措置手法を決定した。この保障措置手法に基づく保障措置機器をIAEA、科技庁との協議をはじめPNC/DOE保障措置技術開発協力協定に基づく米ロスアラモス研究所との協力等により開発し、設置が終了したのでこのシステムの概要について紹介する。

1. はじめに

高速増殖炉原型炉もんじゅ（以下「もんじゅ」という。）は、MOX燃料を扱うこと、ナトリウム冷却であること、使用済燃料が銜詰所に収納されること等から経験の多い軽水炉のそれとはかなり相違点がある。特にナトリウム冷却炉であることから直接炉内の燃料を検認することができない区域（接近困難区域）を持つため、その査察・検認については、かなり以前からIAEA、科技庁との度重なる協議を行ってきた。その結果、「もんじゅ」の保障措置手法が決定したのに伴い、1991年7月に日-IAEA保障措置協定補助取極である施設付属書(Facility Attachment:FA)が発効し科技庁およびIAEAの査察が開始された。また、同年10月には新日本原子力協定上の「将来施設」から「運転施設」となった。

保障措置手法に基づく保障措置機器として、「もんじゅ」では、監視装置としてMUX(Multiplexed CCTV Surveillance System)およびMIVS(Modular Integrated Video System)を、封印装置として、VACOSS(Variable Coding Seal System)およびEタイプメタルシールを使用し、また、新燃料の炉内への装荷、使用済燃料の炉外への取り出し等の燃料

の移動を査察官の立ち会いなしで検認する装置として、放射線モニタを開発して設置することになった。このモニタはフローモニタとして、1992年3月に設置を完了し、IAEAによるアクセプタンステストを受けた後、査察の用に供している。このほか、原子炉の運転状況の監視にはリアクターパワーモニタが、使用済燃料プールの使用済燃料には、チェレンコフ光観測装置が用いられる。

2. 燃料集合体の流れと貯蔵

輸送容器に梱包されて送られてきた新燃料集合体は、燃料搬出入エリアに搬入され、一時輸送容器仮置き場に置かれる。

その後、輸送容器を新燃料取扱室に移動し、新燃料集合体を輸送容器から取り出し、貯蔵ラックに収納する。

この貯蔵ラックに貯蔵されていた新燃料集合体は一体ずつ新燃料移送機で吊り上げられ、新燃料入口ゲートを通して地下台車に移される。地下台車は燃料出入機の下方に移動し、新燃料集合体を燃料出入機に引き渡す。燃料出入機は、新燃料集合体を次の燃料交換時まで、一時、炉外燃料貯蔵槽に保管する。

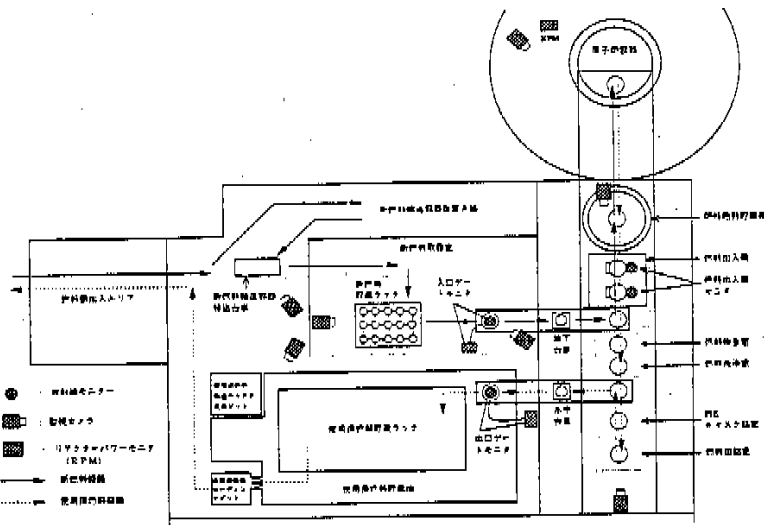


図1 「もんじゅ」燃料取扱経路および取扱機器

燃料交換時には、原子炉は停止され、燃料出入機通路の格納容器ハッチが開かれ、新燃料集合体は炉外燃料貯蔵槽から燃料出入機および炉内中継装置を経由して燃料交換装置に引き取られ、炉心内の所定位置に装荷される。使用済燃料は、逆の経路を辿って炉外燃料貯蔵槽に格納され、充分冷却した後ナトリウムが洗浄され、缶詰缶に封入され、接近困難な区域から出口ゲートを通して燃料池に運ばれ、水中の使用済燃料貯蔵ラックに保管される。

施設外に払い出す場合は、燃料池に隣接している使用済燃料ローディングビットでキャスクに装荷され、キャスク洗浄ビットで表面を洗浄され、トレーラーで搬出される。

「もんじゅ」での燃料取扱経路および取扱機器を図1に示す。

3. フローモニタの概要

3.1 システム構成

前述の接近困難区域に対する保障措置手法は、燃料集合体の接近困難区域への出入りおよび燃料出入機の移動をフローモニタと監視カメラで封じ込め/監視をするものである。フローモニタは3箇所に設置された検認機器からなり、新燃料取扱室には入口ゲートモニタ (Entrance Gate Monitor: 以下「ENGM」という。) が、燃料出入機上には燃料出入機モニタ (Ex-Vessel Transfer Machine Radiation Monitor: 以下「EVRM」という。) が、使用済燃料貯蔵プールには出口ゲートモニタ「Exit Gate Monitor: 以下「EXGM」という。) が設置された。

このモニタの開発分担については、ENGMはIAEAが、その他のモニタは動燃事業団が担当することになった。ただし、動燃事業団担当のうちソフトウェアに関しては真正性(authentication)の観点から、第三者による開発が望ましいため、PNC/DOE保障措置技術開発協力協定の下で米岡ロスアラモス国立研究所(Los Alamos National Laboratory: 以下「LANL」という。) にその開発を依頼した。

なお、上述のモニタ設置箇所には、施設者の運転監視用に用いるモニタが並置されており、入口ゲートでは査察用とは全系統独立に、また燃料出入機および出口ゲートでは中性子検出器および前置増幅器のみを査察用と共用する形で設置されている。

3.2 ENGM

ENGMは、燃料集合体が入口ゲートを通過するとき、IAEAが開発したプルトニウム中性子同時計数装置(Plutonium Neutron Coincidence Counter)の中性子検出用カウンタバンクのなかを貫通するよう配置されており、アクティブニュートロンの同時計数で核分裂性同位体の測定精度を上げるようになっている。「もんじゅ」では新燃料集合体の大量欠損検認用として使用するが、貯蔵中の新燃料の封じ込め/監視が否定的な結果となった場合は、部分欠損検認にも使用される。

中性子検出用カウンタバンクは、4個のポリエチレンブロックが約24cm×24cmの正方形の各辺に設置された構造となっている。各ポリエチレンブロック(幅: 約26cm×奥行: 約9cm×高さ: 約40cm)に

は、6本のHe-3カウンタが埋め込まれており、ポリエチレンブロックの頭部には前置増幅器とHe-3カウンタに高電圧を印加するための分配回路が組み込まれている。各ポリエチレンブロックに組み込まれた電気回路は直列に接続され、高電圧発生回路、シフトレジスタ同時計数回路等が組み込まれている電子装置（JSR-11またはHEC-100）に接続されている。電子装置は一定時間間隔で計測を行い、測定日時およびその時の計数が自動的にデータ記憶用コンピュータに記憶される。使用されているコンピュータの記憶容量は約3カ月分の情報の収納が可能である。検出器からの信号は、2系統の電子装置とコンピュータで処理される。このため1系統が故障しても、もう1系統でバックアップできるようになっており、信頼性を高めている。

燃料集合体の移動方向まで検知できるといわれているが、それは、新燃料移送機によって新燃料貯蔵ラックから引き上げられた燃料集合体が徐々にENGMに近づくとき、計数値は距離の減少とともに次第に増加し、入口ゲートを貫通して地下の新燃料移送通路へ過ぎかると、計数値が急速に減少するからである。

核分裂性同位体の含有量が標準燃料集合体と異なる場合、つまり少量欠損があるか、または燃料集合体がブランケットあるいはその他の炉心要素である

場合は、中性子の計数値が核分裂性同位体の含有量に応じて減少するので、燃料集合体の品質の検認ができることになる。測定は一定時間毎に行われ、記憶される。計数値はデジタル変換されてフロッピーディスクに収録され、査察のとき査察官が取り出し持ち帰る。この情報を解析することにより、施設が申告した燃料集合体の種別と移動回数等が正しいかどうか明らかになるとともに、無申告の移動のないことも検認できる。なお、ここには施設側運転監視用のモニタとして中性子およびγ線検出器が置かれている。ENGMの構成と配置を図2および写真1に示す。

3.3 EVRM

燃料出入機には、ナトリウム雰囲気燃料等を収納するコフィンAと、非ナトリウム雰囲気燃料等を収納するコフィンBとがある。EVRMは、燃料出入機上のコフィンAおよびコフィンBのそれぞれに、中性子検出器と前置増幅器およびγ線検出器が設置されており、コフィンに挿入した燃料集合体が新燃料か照射済燃料かそれともその他の炉心要素かを識別するモニタであり、コフィンA用のモニタシステムであるEVRM-AとコフィンB用のEVRM-Bとがある。EVRM-AとEVRM-Bはそれぞれ独立したモニタシステムであり、キャビネットと信号

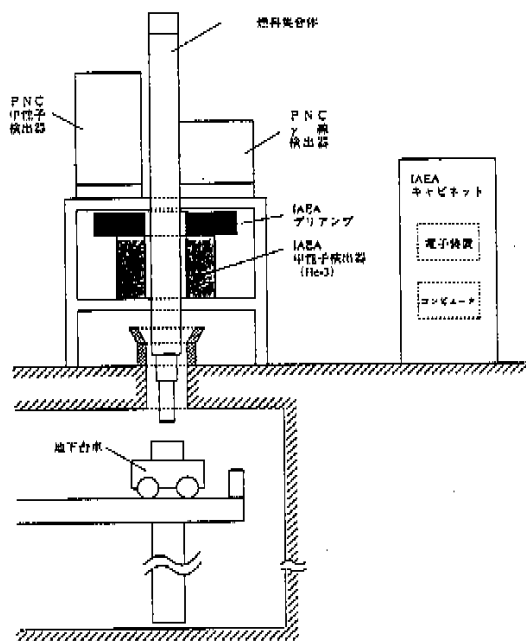


図2 ENGMの構成と配置

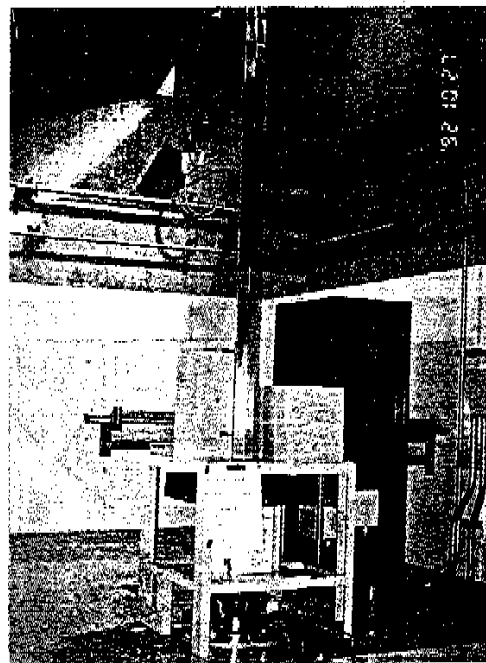


写真1 ENGM

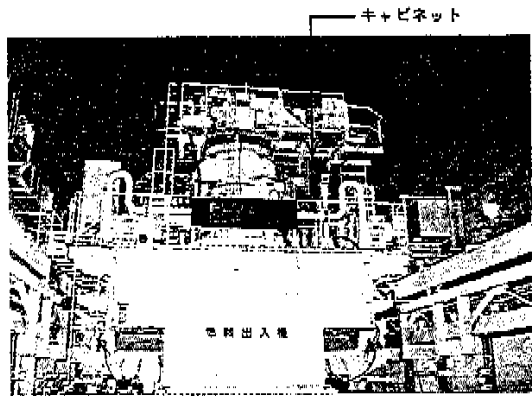


写真2 燃料出入機上に設置されたEVRMキャビネット

分岐器のみが共用になっている (写真2参照)。

各モニタの中性子およびγ線の検出器は直径約40cmの放射線遮蔽体周りの軸対象の位置にそれぞれ設置されており、中性子の計測にはHe-3カウンタが、またγ線の計測にはIonization Chamberが用いられている (図3および写真3参照)。

各検出器への高電圧の印加は、Portable Gamma-ray and Neutron Detector Electronics III (GRAND III:以下「GRAND」という。) と呼ばれる特殊な電子回路から供給され、信号はGRANDで処理され、GRANDの記憶装置に記憶される。GRANDには、パーソナルコンピュータが接続されており、GRANDの記憶装置に貯められた情報は24時間毎にコンピュータに転送される。コンピュータは約3カ月分の情報の記憶が可能である (写真4参照)。

中性子検出器とその前置増幅器は、IAEAと施設側が共用し、信号の処理・記録は別系統となっている。γ線検出系統は検出器を含めすべて別系統となっている。

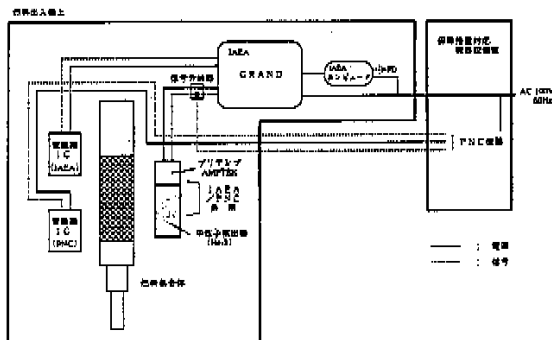


図3 EVRMシステム概略図

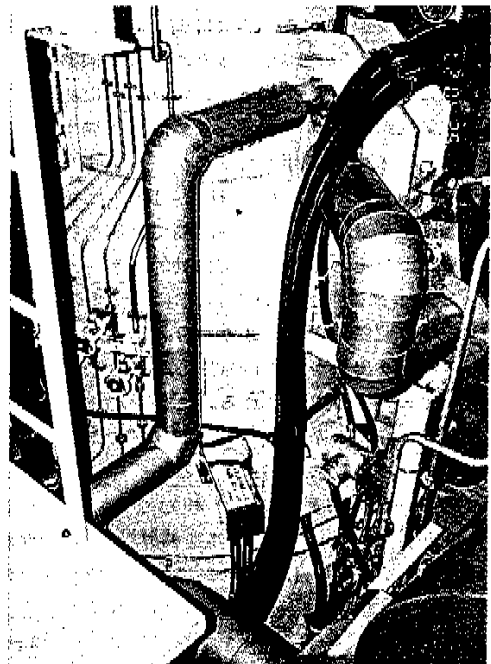


写真3 EVRM検出部

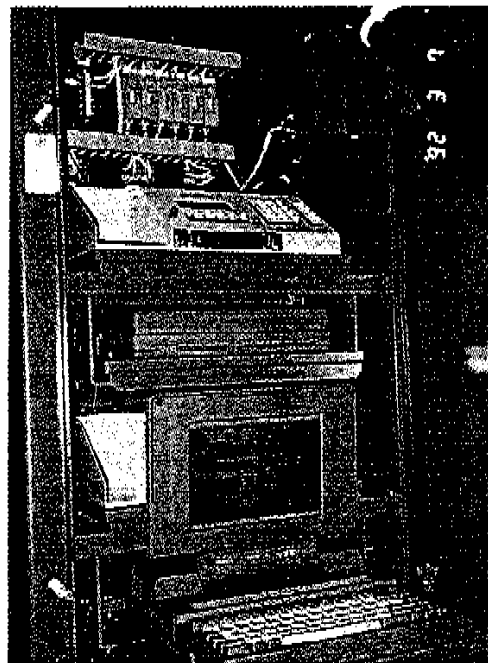


写真4 EVRMのGRANDとコンピュータ

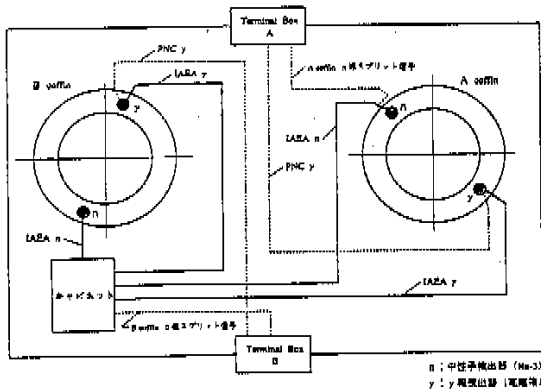


図4 EVRM信号ケーブル配線ルート図

中性子検出器およびγ線検出器の設置位置と燃料出入機上の信号ケーブル配線ルートを図4に示す。また、コフィンAおよびコフィンBに収納された燃料集合体の炉心燃料ペレット部と中性子検出器およびγ線検出器の位置関係を図5に示す。

コフィンAおよびコフィンBの中性子およびγ線は、EVRMにより常時監視されている。燃料移動のためにコフィン内に燃料が収納されるとEVRMの中性子およびγ線のカウント数が上昇する。カウント数の上昇が、直前の一定期間のカウント数に比べて有為な変化であるとGRANDにより判定されると、カウント上昇後の一定期間について通常より短い間隔で時刻およびカウント数データがGRANDのメモリに保存される。次にコフィン内の燃料が炉外燃料貯蔵槽等に吊り降ろされると、燃料出入機モニタの中性子およびγ線カウント数が下降する。この場合も同様にカウント数の下降が、直前の一定期間のカウント数に比べて有為な変化であるとGRAND

により判定されると、カウント下降後の一定期間について通常より短い間隔で時刻およびカウント数データがGRANDのメモリに保存される。

GRANDのメモリに蓄積されたデータ量が設定値(通常1000bytes)を越えると、自動的にGRANDのメモリからパーソナルコンピュータのハードディスクにデータが転送される。パーソナルコンピュータには3.5inchフロッピーディスクドライブがついており、ハードディスクに蓄積されたデータをフロッピーディスクにコピーすることができる。パーソナルコンピュータのハードディスク容量は、月1回の査察時にフロッピーディスクへのコピーを実施すればよいよう、40MBになっている(30日間の最大データ採取量は18.7MBである)。なお、ハードディスクの使用量が設定値(通常75%)を越えると、自動的に古いデータから削除されるようになっている。

3.4 EXGM

EXGM用の中性子およびγ線の検出器は、使用済燃料等が水中台車にのせられて燃料池に移動してくる燃料池入口箇所の水中に設置されており、中性子検出用にはB-10カウンタが、またγ線検出用にはIonization Chamberが用いられている(写真5参照)。

EXGMはこのカウンタ近傍を通過する集合体が確かに照射済の燃料集合体であるか(燃料集合体はこのとき缶詰缶に封入されている)、また正規の移動方向に動いているかを検知するモニタである。

B-10中性子検出器と前置増幅器は水中に伸びたパイプ(長さ約8m)内に挿入され、IAEAと施設側が共用しており、信号処理・記録は別系統となっている。γ線検出器は水中に設置したパイプ(長さ

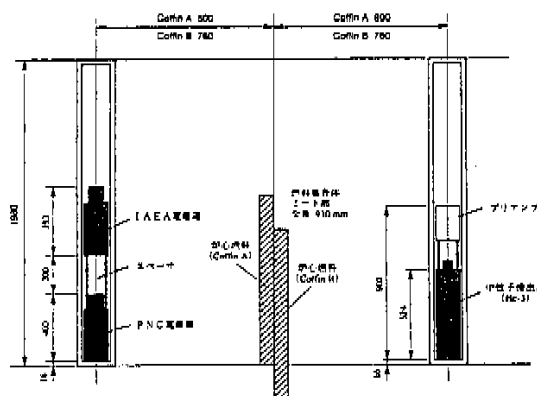


図5 EVRM検出器位置関係



写真5 EXGMの検出部

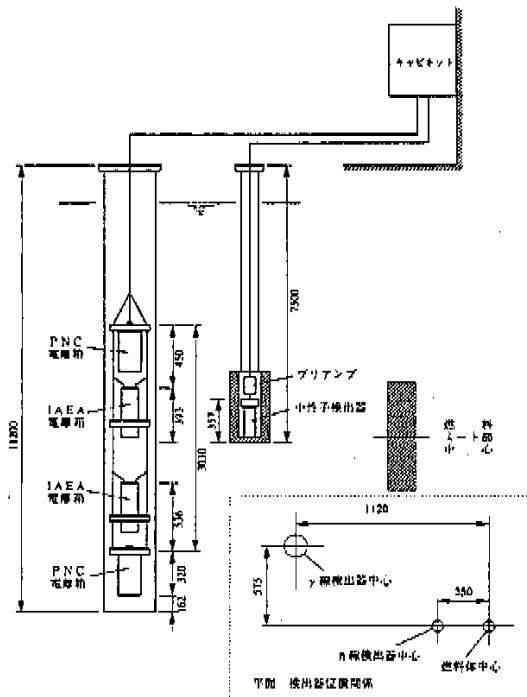


図6 EXGM検出器位置関係

約11m)の上下にIAEA用1対、施設運転用1対の合計4個の電離箱が約2m間隔を置いて挿入されており、 γ 線を計測して放射化していることの確認をするほか、燃料集合体の移動の方向(上昇であるか下降であるか)をも同時に検知できるようになっている。これらの系統はIAEAと施設側で別に運用されている。中性子検出器および γ 線検出器の設置位置と燃料集合体の位置関係を図6に示す。

このように燃料池の水中台車出口付近(水中)の中性子および γ 線は、出口ゲートモニタにより常時監視されている。使用済燃料が水中台車により燃料池まで運ばれ、貯蔵ラックに移送するために燃料移送機で吊り上げると出口ゲートモニタの中性子および γ 線カウント数が上昇する。さらに、燃料移送機が使用済燃料を吊ったまま貯蔵ラックの方へ移動すると、出口ゲートモニタの中性子および γ 線カウント数が下降する。EVRMの場合と同様に、中性子および γ 線カウント数に有為な変化が発生する都度、通常より短い間隔で時刻およびカウント数データがGRANDにより採取され、最終的にはパーソナルコンピュータに保存される。燃料の移動方向は、2個の γ 線検出器により、最初に下側の検出器信号が高くなり、次に上側の検出器信号が高くなれば燃

料が上昇していることを示しており、逆の場合は燃料が下降していることを示している。

検出器からの信号情報は、EVRMと同様にGRANDで処理されるとともに、コンピュータに約3カ月分が記憶される。

3.5 測定機器の校正・再校正

ENGMの校正は、在庫検認時に機器の動作試験を兼ねて、線源を線源用ホルダーに取付け、検出部位の中央にくるようにセットして測定し、その測定値と校正当日の計算によって求めた計数率とを比較して校正する。この時実際に計測された計数率が $\pm 3\%$ 以内で一致していることを確認する。EVRMでは検出部を同様の手順で再校正するが、放射線遮蔽体内に校正用線源を入れることができないため、燃料出入機の集合体駆動機構近辺に線源を置いて測定する。EXGMでは検出部位が水中下にあるため、線源を容器に入れ水中に挿入して測定する。「もんじゅ」ではENGM、EVRM、EXGMの各検出器の導入設置時の校正において、中性子線源にCf-252、 γ 線源にCs-137等を使用したが、ルーチン査察では、校正用線源としてCf-252を使用している。

3.6 システムの保存

(1) 電源供給

施設の電源は、常用系と非常用系の2系統があるが、システムの電源はこの2系統共接続して、電源を二重化しており、それぞれの系統を切り換えて供給できるようになっている。したがって、通常の停電のほか電源設備の点検等で一方の系統が長時間の停電となっても他の系統で対応が可能となっている。さらにEVRMおよびEXGMにはバックアップ用のバッテリーが内蔵されており、ENGMには瞬停防止の無停電電源装置が設置され無停電化を図っている。

(2) 各モニタのオーセンティケーション

各モニタのデータの真正性確認(authentication)のため、各モニタの検出器、電子回路およびコンピュータ等は、IAEA査察官自身の手によって現場に設置する前に点検および校正用線源を用いた動作確認が行われ、しかもこれらの機器はすべてキャビネットに収納され、査察官によってシールが施されている。また、信号ケーブル等はコンジットパイプを用いて誘導され要所々々にシールが施されている。

4. あとがき

接近困難な区域を持つ「もんじゅ」の査察・検認については、度重なるIAEA、科技厅との打合わせ

を行い、その成果はIAEA保障措置クライテリア(1991年-1995年)に、新炉型のためのクライテリアとして結実し、さらに高速実験炉「常陽」の査察・検認手法として「もんじゅ」に先行して実用となっている。これらの成果を踏まえ、IAEA、科技庁との協議およびLANLの協力等により開発したフローモニタは、保障措置上の要件を充分満足し、信

頼性の高いシステムとなったと考えている。

参考文献

- 1) T.Deshimaru, Y.Okuda et al. "Safeguards in Prototype Fast Breeder Reactor MONJU", Proc. 1994 IAEA Symposium on International Safeguards, Vienna, Austria, March 14-18, P9. (1994).